30

MÉMOIRE

SUR LA

PROPAGATION DES COURANTS ÉLECTRIQUES,

Résumé des expériences faites à Nancy,

Par MM. Claude GUILLEMIN et Emile BURNOUF,

DU 23 SEPTEMBRE AU 10 OCTOBRE 1859.

Une théorie générale *a priori* de la propagation des courants électriques existe depuis longtemps dans la physique mathématique sous le nom d'Ohm, son inventeur. Plusieurs formules contenues dans cette théorie mathématique ont été vérifiées par l'expérience; mais les lois générales qui président à la transmission du fluide dans les conducteurs métalliques ne l'ont pas encore été : parmi les phénomènes observés jusqu'à ce jour, les uns semblent s'expliquer plus aisément par l'hypothèse de pures et simples ondulations analogues aux ondulations de la lumière; d'autres supposent un mode différent de propagation, et, malgré la différence des vitesses, présentent de grandes analogies avec les phénomènes de la chaleur. Or, on sait que la lumière se propage d'une manière uniforme; de sorte qu'étant donnée une surface

d'une certaine grandeur et un foyer de lumière invariable, cette surface, aussitôt que l'écran est enlevé, reçoit de ce foyer toute la lumière qu'elle en peut recevoir, en supposant qu'elle reste elle-même à une distance invariable du foyer lumineux. La chaleur se propage d'une façon toute différente dans les corps qui la conduisent : si l'on chauffe par son extrémité une barre de métal au moyen d'un foyer de chaleur invariable, on voit que l'autre bout de ce conducteur s'échauffe peu à peu et n'arrive qu'après un certain temps à son maximum de température. Il ne semble pas absolument nécessaire que l'électricité suive exactement l'une ou l'autre de ces deux lois; il se peut qu'elle obéisse à une loi qui lui soit propre et que la science n'ait pas encore déterminée ; mais quelle qu'elle puisse être, elle doit nécessairement rendre compte d'un grand nombre de phénomènes non encore expliqués et ne se trouver en contradiction avec aucun des faits bien constatés et analysés.

C'est à l'étude de cette grande question de théorie que nous avons consacré le temps de nos vacances ; la construction des appareils en ayant employé une notable partie, le reste nous a pourtant suffi à déterminer d'une manière générale, mais non encore dans tous ses détails, le mode de propagation des courants dans les grands conducteurs métalliques. L'administration des télégraphes a bien voulu mettre à notre disposition depuis le 23 septembre jusqu'au 10 octobre 1859, les fils de ligne qui rayonnent autour de la station de Nancy et dont les lon-

gueurs sont de 72, de 131, de 201 et de 250 lieues environ. Sur ces fils, généralement assez mal isolés, nous avons pu opérer par un temps très-favorable qui compensait en partie le mauvais isolement des lignes et les pertes qui en sont la conséquence nécessaire. Nous avons obtenu treize séries d'observations comprenant environ 220 nombres lesquels expriment des temps et des intensités.

La question que nous nous sommes posée tout d'abord a été de savoir si le courant se propage dans ces fils d'une façon uniforme ou s'il en est autrement; en d'autres termes, si l'on considère sur un long fil métallique un certain point *a*, situé à une distance donnée de la source électrique, le courant, à l'instant même où il y arrive, a-t-il l'intensité qu'il doit conserver pendant toute la durée de son passage, en admettant que la pile est une pile à courant constant?

Pour résoudre cette question fondamentale, il est évident qu'il faut pouvoir en quelque sorte sonder, sur ce point du fil, le courant aux divers moments de son passage et déterminer son intensité pour chacun de ces moments. Or, mesurer l'intensité d'un courant pendant un temps d'une durée infiniment petite est une expérience impossible à réaliser; nous étions donc naturellement conduits à la mesurer pour un temps très-court, mais d'une durée appréciable et connue, pourvu que cette durée fût toujours la même. D'un autre côté il était nécessaire de pouvoir mesurer cette intensité sans arrêter

le courant lui-même par une rupture du fil ; car autrement l'on eût pu craindre que le courant, parvenu à ce point qu'il n'eût pu franchir, ne se fît obstacle à lui-même et ne se présentât dans des conditions qui n'eussent point été normales. Enfin il était de la plus haute importance que si l'on faisait usage d'un appareil tournant au moyen duquel l'expérience se renouvellerait plusieurs fois de suite dans un temps très-court, à chaque renouvellement de l'expérience le fil se trouvât complétement ramené à l'état neutre où il se trouvait d'abord.

L'appareil dont nous avons fait usage remplit ces différentes conditions. Il se compose d'un cylindre non conducteur (de bois, d'ivoire, etc.) pouvant tourner autour de son axe avec une vitesse connue et uniforme pour toute la durée d'une expérience. Sur sa surface sont incrustées trois lames de cuivre L, L', *l*, communiquant avec leurs viroles respectives V, V', *v*. Sur ces lames et sur ces viroles glissent, sans vibrer, cinq ressorts recourbés à leur extrémité qui seule établit les contacts au passage des lames. La lame L a la forme d'un triangle rectangle dont le grand côté adjacent à l'angle droit est dans une des génératrices du cylindre. Le ressort R établit par la virole V la communication de la pile avec cette lame ; toutes les fois que celle-ci passe sous le ressort R' le courant s'engage dans le fil télégraphique F dont l'autre extrémité communique avec la terre. Aussitôt que la lame L a quitté le ressort R', le courant de la pile n'arrive plus au fil de ligne. Un instant après, ce même ressort

rencontre la lame L′ qui par la virole V′ communique avec la terre; de sorte qu'à partir de ce moment le fil touche le sol par ses deux bouts, s'y décharge et revient ainsi à l'état neutre, comme l'exige le prochain retour de la lame L. Il est évident, d'après ce qui précède : 1° que le ressort R′ étant fixe, le courant de la pile ne passe dans le fil de ligne que pendant un temps déterminé et toujours le même pour une même vitesse de rotation ; 2° que dans ce cas, si l'on avance le ressort R′ vers la pointe ou vers la base du triangle L, ce temps est raccourci ou prolongé d'une quantité connue.

Considérons maintenant ce qui se passe sur un point du fil, tel que *a*. Si le ressort R′ passe sur la lame L assez près de la pointe et mesure par conséquent un temps assez court, le courant, dont on sait que la vitesse n'est pas infinie, ne sera pas parvenu en *a*, lorsque déjà la lame L aura franchi le ressort. Mais si ce dernier est plus éloigné du sommet du triangle, le courant aura dépassé le point *a* d'une distance d'autant plus grande que l'arc parcouru sur L par le ressort R′ sera lui-même plus grand.

La question se réduit donc à mesurer l'intensité du courant électrique, lorsqu'il arrive en *a* et lorsqu'il a dépassé ce point depuis un temps plus ou moins long. La lame *l* est destinée à remplir cette fonction. Cette lame est rectangulaire, fort étroite; et celui de ses bords qui passe le dernier sous le ressort *r* est dans la même génératrice que le grand côté de L. La durée de ce

contact est fort petite, mais exactement appréciable comme celle du contact R'. Pour ne point arrêter le courant en *a* au moment où nous voulons mesurer son intensité, nous prenons sur ce point une *dérivation* d'un intervalle déterminé *a b*, représenté soit par une certaine longueur du fil de ligne, soit par une bobine de résistance connue. Cette dérivation *f f'* ne peut se produire que durant le contact de *r* et de *l*, lequel dure un temps toujours le même, quelle que soit la durée du contact R' L. Un galvanomètre G placé sur le fil de dérivation donne l'intensité du courant pour les diverses positions de R', c'est-à-dire, après que le courant a dépassé le point *a* depuis un temps plus ou moins long : 1° Si la position de R' est telle que le courant ne soit pas arrivé en *a* lorsque déjà le ressort *r* a quitté *l*, la déviation du galvanomètre est nulle ; 2° si le courant, en arrivant en *a* possède toute son intensité, la déviation du galvanomètre sera tout d'abord à son maximum ; 3° si cette intensité est la même pour toutes les sections du courant, la déviation de l'aiguille restera constante ; 4° mais si cette intensité est variable, les déviations de l'aiguille varieront suivant les arcs parcourus par R' sur la plaque L, et devront reproduire par leurs amplitudes les intensités du courant à ses divers moments.

Cette épreuve devra être faite non-seulement au point *a*, mais sur plusieurs autres points du fil de ligne plus ou moins éloignés de la source électrique ; et les nombres représentant des durées égales des contacts R' L pour

ces différents points, étant mis en regard les uns des autres, il deviendra possible de construire ce que l'on peut nommer la *courbe des intensités.*

Le temps pendant lequel l'administration des télégraphes a pu mettre ses fils à notre usage, ne nous a pas permis de résoudre toutes les questions que soulève ce grand problème. La préparation d'expériences faites presque toujours pendant la nuit, en a absorbé nécessairement une partie ; une autre était employée à constater préalablement l'état de la ligne, son isolement ou ses pertes, l'effet total produit dans ces conditions par nos piles sur nos appareils de mesure. En attendant que nous puissions compléter les recherches que nous avons commencées, je vais exposer les résultats précis et certains que nous avons obtenus, retranchant tout à fait ce que l'expérience ne nous offre encore qu'à l'état de probabilité.

1° *Le courant ne se propage pas avec une intensité uniforme* à la façon de la lumière. Il arrive au point *a* avec une intensité relativement faible, qui croît ensuite graduellement, mais non d'une manière uniforme ni proportionnelle à la durée des contacts ; après un certain temps, cette intensité atteint un *maximum* qu'elle ne dépasse plus, quelle que soit la durée du contact R'L.

En d'autres termes, *un courant électrique présente* dans son développement *deux périodes,* l'une d'intensité *variable et croissante;* l'autre d'intensité *constante* et toujours la même.

Le point M, maximum de la période croissante où se fait le raccordement de sa courbe avec la ligne horizontale, ne peut pas être déterminé rigoureusement par l'expérience ; en effet la portion de la courbe la plus voisine de ce point doit se confondre sensiblement avec l'horizontale, quelle que soit d'ailleurs la forme de cette courbe. En d'autres termes, lorsque l'on fait avancer le ressort R' vers la base de la lame triangulaire, il arrive un moment où la déviation de l'aiguille aimantée ne croît plus que d'une quantité minime et se confond sensiblement avec la déviation fixe qu'elle doit conserver pour des contacts plus prolongés.

Le point *m* minimum de la période croissante, lequel représente la pointe ou la tranche antérieure du courant, peut être déterminé par des appareils très-sensibles ; et la courbe des intensités ne s'allonge pas indéfiniment de manière à rencontrer la ligne des x sous un angle infiniment petit. — En d'autres termes, lorsque le courant arrive en *a* il ne produit pas d'abord une déviation très-petite du galvanomètre, laquelle croîtrait ensuite insensiblement. Mais pour un petit mouvement du ressort R' vers la base de la lame L, c'est-à-dire, pour une faible augmentation de la durée du contact, il y a un accroissement rapide dans la déviation de l'aiguille aimantée.

2° Lorsque l'on étudie les intensités successives du courant, non plus au point *a* éloigné de la pile, mais à l'entrée même du fil télégraphique, en prenant la déri-

vation au point e, on observe qu'*à l'instant même où s'établit le contact, l'intensité est supérieure à celle de la période constante;* qu'ensuite elle diminue très-rapidement jusqu'à ce qu'elle soit devenue égale à cette dernière. Il y a donc ici une période inverse de la période croissante dont nous avons rendu compte : nous en donnerons plus tard l'explication.

Telle est donc la forme générale des courants électriques dans les conducteurs métalliques linéaires.

Le même appareil que nous avons décrit tout à l'heure a été appliqué par nous à l'étude du phénomène de l'induction, généralement considéré comme instantané ou du moins comme n'ayant qu'une durée presque inappréciable. Tout le monde sait que les courants induits ne se produisent que si le courant inducteur, ou l'aimant qui le représente, offre dans sa manière d'agir ou dans son intensité une période variable. Mais comme jusqu'à présent les courants linéaires des fils télégraphiques avaient été regardés comme ayant une intensité uniforme pendant toute leur durée, et que d'ailleurs (si l'on en excepte nos expériences de Toulouse faites en 1854 et publiées en abrégé dans une note très-courte), on n'avait guère étudié l'induction que dans des bobines; le fait d'un courant induit né dans un fil rectiligne parallèle à un fil inducteur, demeurait une sorte de mystère. Mais une fois constatée par nous l'existence d'une période variable dans un simple courant rectiligne issu d'une pile, nous avons été naturellement conduits à penser que le courant

induit correspond à cette période elle-même. L'expérience a complétement vérifié cette supposition. *Le courant induit correspond exactement à l'état variable du courant inducteur;* il commence et se développe avec lui; il se termine lorsque le point maximum, où commence l'état permanent, est arrivé. Ces deux phénomènes présentent la même durée; et aussitôt que sur un point *a* du fil inducteur la période constante est établie, comme il n'y a plus de variation dans l'état électrique de ce fil, il n'y a plus de courant d'induction dans le fil parallèle et le galvanomètre retombe à 0°. *Le courant induit peut donc être représenté par une courbe terminée par deux zéros* et présentant un maximum d'intensité. Quelle est la forme de cette courbe ? nous ne pouvons la donner avant d'avoir multiplié les expériences et de les avoir soumises au calcul. Nous pouvons dire seulement que la période décroissante qui suit le maximum est beaucoup plus courte que la première : cette différence s'explique d'elle-même si l'on considère comment se termine la période croissante du courant inducteur ; et le calcul démontrera que l'inégalité des deux périodes du courant induit est une conséquence nécessaire de la loi de propagation du courant de la pile telle que nous l'avons constatée par l'expérience. Nous n'avons pas besoin de remarquer que les courants contraires qui composent les *courants induits de second ordre* ou d'un ordre plus éloigné, sont eux-mêmes une conséquence ultérieure de cette loi.

Nous n'entrerons pas, quant à présent, dans de plus amples détails sur ces divers sujets. Nous ne devons faire connaître ici que les résultats généraux de nos recherches, ayant besoin de répéter et de varier les expériences, afin de résoudre un grand nombre de questions secondaires qui se soulèvent les unes les autres.

La question depuis longtemps abordée par les physiciens de la vitesse des courants électriques, se trouve être, d'après les expériences précédentes, beaucoup plus complexe qu'elle ne le semblait au premier abord. En effet *il n'existe pas à proprement parler une vitesse de l'électricité :* puisque tout courant rectiligne se compose de deux périodes, commence par un minimum d'intensité, et atteint plus tard un maximum qu'il conserve ; comme, d'autre part, à l'entrée même du fil il existe une intensité plus grande encore au moment où le courant s'y engage et que cette intensité décroît jusqu'au moment où elle atteint le maximum définitif du courant une fois établi ; il est évident que la question des vitesses doit être posée aussi bien pour le minimum qui chemine dans le fil à la tête du courant, que pour le maximum qui termine la période croissante ; et qu'enfin il est nécessaire de suivre dans le fil l'écoulement de cette électricité en quelque sorte surabondante, qui accompagne l'établissement du contact de la pile avec le conducteur. De plus, s'il est vrai que la vitesse varie avec le coefficient de conductibilité, les questions relatives aux vitesses doivent être traitées pour les différents conducteurs.

Enfin, si les circonstances diverses où le fil peut être placé, soit qu'il se trouve plus ou moins bien isolé, soit qu'il soit transformé en une sorte de condensateur, influent sur la vitesse du courant, celle-ci ne peut pas être déterminée d'une manière absolue ni une fois pour toutes par quelque appareil que ce puisse être. Nous poursuivons en ce moment l'étude de ces divers problèmes, sur lesquels nous espérons pouvoir réunir assez de données expérimentales pour fonder des calculs sérieux et arriver enfin à des résultats définitifs touchant les vitesses.

—

Nous devons aussi faire part à l'Académie de certains faits qui se sont produits, durant nos expériences, dans les fils télégraphiques, et qui méritent d'appeler l'attention des expérimentateurs.

1° Ayant eu à nous servir de fils télégraphiques d'une assez grande longueur, comme celui qui partant de Nancy, se rend à Paris et de là, passant par Troyes, Chaumont et Vesoul revient à la station de Nancy ; ou encore un des fils qui partant de Nancy se rend à Paris, puis de là à Strasbourg, et revient de cette dernière ville à son point de départ ; nous avons dû, avant toute expérience, constater au moyen du galvanomètre l'état d'isolement de ces grandes lignes. Or, une assez forte pile de Daniel étant mise en contact avec un de ces fils, dont l'autre bout était isolé, la *perte* de courant, produite soit par les poteaux, soit autrement, a marqué au galvanomètre une certaine déviation. Nous avons

alors mis en contact avec la terre l'extrémité isolée du fil, et nous avons été fort étonnés de voir la déviation demeurer la même. Nous avons constaté ce fait plusieurs fois dans différentes conditions, avec différents galvanomètres, et en dernier lieu avec une boussole qu'avait apportée M. l'inspecteur Blavier, désireux de constater par lui-même un fait si extraordinaire. On sait que dans ces expériences le galvanomètre est placé entre la pile et le fil de ligne ; il semblait donc que la perte était égale au courant lui-même et qu'aucune portion d'électricité ne parvenait à l'extrémité du fil. Or il n'en était rien, puisque, le galvanomètre étant placé sur ce dernier point et mis d'ailleurs en communication avec le sol, la déviation de l'aiguille était encore assez considérable. — Nous n'avons pas poussé plus loin l'étude de ces faits, notre temps étant consacré à d'autres questions. Mais il semble, d'après ces observations, que l'étude des lois des dérivations doit être reprise, et qu'il ne faut peut-être pas, selon l'usage des physiciens, assimiler les dérivations qui se font vers le sol avec celles des courants fermés composés uniquement de fils métalliques. Nous nous proposons de reprendre prochainement l'étude de ces faits qui intéressent à la fois la théorie des courants et leur application à la télégraphie.

2° Un fait d'une nature toute différente a été aussi constaté dans le cours de nos expériences. Un soir de septembre, vers dix heures, le ciel étant d'une entière pureté et fort découvert sur toute la ligne de l'Est;

pour constater, selon notre usage, si les fils ne produisaient pas un courant qui leur fût propre, nous avons isolé la grande ligne de Nancy, Paris, Troyes, Vesoul et Nancy ; ce fil d'environ 200 lieues, n'étant en communication avec aucune pile, ni avec la terre, nous en avons réuni les deux extrémités par le moyen d'un excellent galvanomètre de Gourjon. Celui-ci a aussitôt accusé un courant propre dans le fil par une déviation de 60°. Mais peu à peu, non par une simple oscillation, mais par une suite nombreuse de petites oscillations, cette déviation a diminué ; et au bout d'un quart d'heure environ, elle était réduite à 0°. Mais, les oscillations continuant toujours, l'aiguille a franchi le 0 ; la déviation s'est produite en sens contraire de la première, s'est élevée jusque vers 60° degrés ; puis de là revenant par des oscillations lentes comme la première fois, elle a de nouveau retrouvé le 0°, l'a franchi une seconde fois ; et ce curieux phénomène se continuait encore à une heure du matin, où nous avons passé à nos autres recherches. — Le lendemain dimanche, par un ciel sans nuage, vers deux heures après midi, nous avons repris la même expérience : cette fois l'aiguille aimantée est restée tout à fait immobile, attestant ainsi qu'il n'y avait dans la ligne aucun courant électrique. — Le soir du même jour, vers neuf heures, aucune déviation du galvanomètre, aucun courant ; mais à dix heures et demie environ, le mouvement de l'aiguille a recommencé comme la veille, présentant la même série d'oscillations à l'Est et à l'Ouest

du méridien magnétique. — Enfin la même expérience reproduite par un temps couvert, mais non pluvieux, a offert une entière immobilité de l'aiguille.

Il est certain que des observations de ce genre doivent être multipliées, qu'elles doivent être faites dans des conditions aussi variées que possible, et qu'à chacune d'elles on doit constater les circonstances atmosphériques au milieu desquelles le fil est ou n'est pas parcouru par des courants électriques. Nous devons toutefois dire que les courants directs et inverses, que nous avons observés, ont tous accompagné le dépôt de la rosée sur les fils; que ceux-ci se sont montrés pendant le jour dans un état neutre; qu'ainsi ces courants propres des longues lignes télégraphiques paraissent être des phénomènes nocturnes, qui ne se produisent que sous un ciel serein. Soit qu'il faille voir en eux des phénomènes thermo-électriques produits par les variations de température des plaines et des vallées que les fils traversent, soit qu'ils viennent du dépôt même de la rosée et de son évaporation sur ces fils dont la surface est d'environ douze mètres carrés par kilomètre, il y a ici de toute manière un phénomène d'autant plus curieux à étudier qu'il se rattache probablement aux plus grandes questions de la météorologie.

Nancy, 1er décembre 1859.

Note. Depuis la lecture de ce mémoire, M. Cl. Guillemin continuant la même série d'expériences à la station centrale de Paris, a reconnu les faits suivants.

La durée de l'état variable diminue quand on augmente le nombre des éléments de la pile. La surface de ces éléments ne parait pas avoir ici d'influence particulière.

A dimensions égales un élément de Bunsem donne un état variable plus court qu'un élément de Daniel.

Une dérivation à la terre du pôle de la pile en contact avec le fil de ligne augmente la durée de l'état variable. Il en est de même de l'humidité atmosphérique.

(*Extrait des Mémoires de l'Académie de Stanislas.*)

Nancy, imprimerie de v^e^ Raybois, rue du faub. Stanislas, 3.

APPAREIL POUR LES INTENSITÉS

des courants. électriques

